第 38 卷第 2 期　　生　态　学　报　　Vol.38,No.2
2018 年 1 月　　ACTA ECOLOGICA SINICA　　Jan.,2018

DOI:10.5846/stxb201701090068

李志,袁颖丹,胡耀文,孟文武,张学玲,郭晓敏,张文元,胡冬南,牛德奎.海拔及旅游干扰对武功山山地草甸土壤渗透性的影响.生态学报,2018,38(2):635-645.

Li Z, Yuan Y D, Hu Y W, Meng W W, Zhang X L, Guo X M, Zhang W Y, Hu D N, Niu D K.Effects of elevation and tourism disturbance on meadow soil infiltration on Wugong Mountain.Acta Ecologica Sinica,2018,38(2):635-645.

海拔及旅游干扰对武功山山地草甸土壤渗透性的影响

李　志[1,2,3],袁颖丹[1,2,3,4],胡耀文[1,2,3],孟文武[1,2,3],张学玲[1,2,3],郭晓敏[1,2,3],张文元[1,2,3],胡冬南[1,2,3],牛德奎[1,2,3,*]

1 江西农业大学林学院,南昌　330045

2 江西省森林培育重点实验室,南昌　330045

3 江西特色林木资源培育与利用 2011 协同创新中心,南昌　330045

4 南京林业大学林学院,南京　210037

摘要:土壤渗透能力是影响土壤侵蚀的重要因素之一,是反映土壤水源涵养及调节功能的重要指标,目前对于亚热带山地草甸土壤渗透性方面研究较少。江西武功山草甸是亚热带山地草甸的典型代表,以面积广和分布基准海拔低的特点,在华东植被垂直带谱中具有典型性和特殊性,但是人为干扰和过度旅游开发使武功山脆弱的山地草甸出现严重退化和破碎化态势。以武功山不同海拔及旅游干扰程度山地草甸土壤为研究对象,分别测定 0—20 cm 和 20—40 cm 土层土壤的初渗率、稳渗率、平均入渗率、前 60 分钟渗透总量、温度、湿度、容重、最大持水量、最小持水量、毛管持水量、pH、有机质、速效氮、速效磷、速效钾等理化指标,分析不同海拔及干扰程度草甸土壤渗透性特征,探讨影响土壤渗透性的相关因子,为亚热带地区退化草甸的修复及可持续经营提供参考。结果表明:(1)1600—1800 m 范围,随着海拔升高,土壤渗透性呈降低趋势,在 1900 m 范围土壤渗透性又有所提高,各海拔土壤渗透性排序为 1600 m>1700 m>1900 m>1800 m。(2)随着干扰程度增强,草甸土壤渗透性呈降低趋势,各干扰程度的土壤渗透性排序为无干扰>轻度干扰>中度干扰>重度干扰。(3)所有草甸分布区 0—20 cm 土层的土壤渗透性均高于 20—40 cm 土层,初渗率>平均入渗率>稳渗率。(4)通用经验模型更适合武功山草甸土壤水分入渗过程,Horton 模型次之,Philip 模型和 Kostiakov 模型拟合效果都比较差。(5)土壤渗透性与土壤湿度、毛管持水量呈显著正相关($P<0.05$),与容重呈显著负相关($P<0.05$),初渗率及平均入渗率与速效氮含量显著正相关($P<0.05$),稳渗率、平均入渗率、渗透总量与速效钾含量呈显著正相关($P<0.05$)。

关键词:海拔;旅游干扰;草甸;渗透性;武功山

Effects of elevation and tourism disturbance on meadow soil infiltration on Wugong Mountain

LI Zhi[1,2,3], YUAN Yingdan[1,2,3,4], HU Yaowen[1,2,3], MENG Wenwu[1,2,3], ZHANG Xueling[1,2,3], GUO Xiaomin[1,2,3], ZHANG Wenyuan[1,2,3], HU Dongnan[1,2,3], NIU Dekui[1,2,3,*]

1 *College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang* 330045, *China*

2 *Jiangxi Key Laboratory of Silviculture, Nanchang* 330045, *China*

3 *Collaborative Innovation Center of Jiangxi Typical Trees Cultivation and Utilization, Nanchang* 330045, *China*

4 *College of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing* 210037, *China*

Abstract: Soil infiltration capacity is one of the most important factors affecting soil erosion and is an important index

基金项目:国家自然科学基金项目(31360177,31560150);国际植物营养研究所合作项目(IPNI-JX29);江西省研究生创新专项资助项目(YC2013-B029)

收稿日期:2017-01-09;　　**网络出版日期:**2017-09-14

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: ndk2157@163.com

reflecting soil water conservation and regulation function. The Wugong Mountain meadow is a representative subtropical mountain meadow in Jiangxi Province, which is in the typical and special vertical vegetation zone of East China. However, human disturbance and excessive tourism development caused serious degradation and fragmentation of this fragile mountain meadow. This study evaluated the alpine meadow soil infiltration capacity at different elevations and disturbance levels from the fringe meadow upwards to the top in Wugong Mountains. Set an elevation gradient experiment treatment at intervals of about 100 m, four experiment treatments namely 1600 m, 1700 m, 1800 m, and 1900 m. In addition, according to the loss of vegetation coverage caused by tourism disturbance, set four disturbance experiment treatments which included the no disturbance (control check, abbreviation was CK, vegetation coverage rate ≥90%), light disturbance (LD, 60% ≤ vegetation coverage rate < 90%), medium disturbance (MD, 30% ≤ vegetation coverage rate < 60%), and severe disturbance (SD, vegetation coverage rate <30%). Various indices including the soil initial infiltration rate, steady infiltration rate, average infiltration rate, total infiltration of the first 60 min, soil temperature, soil humidity, soil bulk density, maximum water holding capacity, minimum water holding capacity, capillary water holding capacity, pH, organic matter, available nitrogen, available phosphorus, and available potassium were measured in two soil layers, 0—20 cm and 20—40 cm, to analyze soil infiltration characteristics at different elevations and disturbance levels and to be able to discuss the factors that affect the soil infiltration and provide references for the ecological restoration and sustainable management of degraded meadows in the subtropical zone. The results showed that (1) as elevation increased, soil infiltration decreased at elevations in the 1600—1800 m range, but increased at 1900 m. The amount of soil infiltration from highest to lowest was 1600 m>1700 m>1900 m>1800 m. (2) As disturbance level increased, soil infiltration decreased, and the amount of soil infiltration from highest to lowest was CK>LD>MD>SD. (3) Soil infiltration of the upper layer (0—20 cm) was higher than that of the lower layer (20—40 cm), and infiltration rate from highest to lowest was initial infiltration rate>average infiltration rate>steady infiltration rate. (4) The common empirical infiltration model was the most suitable representation of the infiltration process of meadow soil moisture in the Wugong Mountains, followed by the Horton model, whereas the Philip and Kostiakov models were not suitable. (5) Soil infiltration and capillary water—holding capacity were significantly positively correlated ($P < 0.05$), and was significantly negatively correlated with soil bulk density ($P < 0.05$). Available nitrogen content was significantly positively correlated with initial infiltration rate and average infiltration rate ($P < 0.05$), and available potassium content was significantly positively correlated with the steady infiltration rate, average infiltration rate, and with total infiltration ($P < 0.05$).

Key Words: elevation; tourism disturbance; meadow; infiltration; Wugong Mountain

土壤是植被发挥水文调节作用的主要场所,土壤渗透能力是影响土壤侵蚀的重要因素之一,是反映土壤水源涵养及调节功能的重要指标[1-2]。李建兴等[3]对三峡库区几种边坡植被土壤渗透性进行研究,发现香根草(*Vetiveria zizanioides*)的土壤渗透性最好,其次是紫花苜蓿(*Medicago sativa*)和百喜草(*Paspalum notatum*),狗牙根(*Cynodon dactylon*)土壤的渗透性最差;郁耀闯和张光辉[4]对黄土高原丘陵区农耕地土壤渗透性的研究表明,容重、孔隙度、农事活动和作物根长是影响渗透性季节变动的关键因素;石玉龙等[5]对西藏色季拉山不同海拔梯度急尖长苞冷杉(*Abies georgei var. smithii*)土壤入渗特征的研究表明,海拔越高,土壤渗透性越差;王意锟等[6]对浙西南不同经营强度下毛竹(*Phyllostachys heterocycla*)林的研究表明,人为干扰弱的林地,土壤渗透性更好。张淑兰等[7]对小兴安岭不同类型森林土壤特征的研究表明,浅层(0—20 cm)土壤的初渗率和稳渗率大于深层(20—50 cm);Jeff 等[8]通过对美国南卡罗来纳州的农田添加生物炭的实验,发现生物炭的添加对土壤渗透性具有很好的改良作用;康金林等[9]通过室内模拟实验,发现土壤入渗率与不同控制水平土壤初始含水率和容重呈反比的关系。综合来看,当前国内外关于土壤渗透性的研究中,大多关注工程、农业、林地或室内模拟实验的内容,也从不同角度分析了土壤渗透性的影响因素,而对于亚热带山地草甸土壤渗透性

方面研究较少。

江西武功山草甸是亚热带山地草甸的典型代表,以面积广和分布基准海拔低的特点,在华东植被垂直带谱中具有典型性和特殊性,但人为干扰和过度旅游开发使武功山脆弱的山地草甸出现严重退化和破碎化态势[10]。我们已在武功山草甸土壤养分[11-12]、种子库特征[13]、山地草甸景观的旅游营销[14]及草甸物种对气候变化的影响[15]等方面有一定研究积累,这里依据武功山山地草甸特殊生态系统对旅游干扰和海拔具有较为敏感性的特点,开展不同海拔高度和旅游干扰程度的草甸土壤渗透性和理化性质测定与分析,探讨土壤渗透性特征及其主要影响因子。研究结果将使人们对亚热带山地草甸土壤水文特征有深入了解,为亚热带山地草甸的科学研究、生态修复和可持续经营规划提供理论参考。

1　材料与方法

1.1　研究区自然概况

江西武功山位于吉安市、萍乡市、宜春市三个地级行政区交界处(114°10′—114°17′ E,27°25′—27°35′ N),是湘江水系及赣江水系的分水岭,绵延大约 120 km,总面积大约 970 km^2,年均温为 14—16℃,夏季的最高温为 23℃,年均日照时长为 1580—1700 h,年均蒸发量为 1360—1700 mm,年均湿度值为 70%—80%,年均降雨量为 1350—1570 mm,武功山山体岩石类型主要为花岗岩和片麻岩,主峰白鹤峰(金顶)海拔 1918.3 m[16]。武功山草甸分布区的土壤主要是亚热带山地草甸土,色泽幽黑,干后成块,草甸分布主要开始于海拔 1600 m 左右,主要有禾本科的芒(*Miscanthus sinensis*)、野古草(*Arundinella anomala*)、茅根(*Perotis indica*)等,还有少量蓼科(Polygonaceae)、蔷薇科(Rosaceae)、唇形科(Labiatae)和十字花科(Cruciferae)植物,其中,芒是区域内的分布最广的建群种植被[17]。

1.2　试验设计与样品采集

从海拔和旅游干扰两个方面对武功山草甸土壤渗透特征进行综合调研。2013 年 10 月,从草甸分布边缘区开始向上至山顶,每隔约 100 m 左右的范围设置为一个海拔梯度,即 1600 m、1700 m、1800 m、1900 m,在每个海拔梯度范围选择无干扰的草甸区域,随机设置 3 个 10 m×10 m 的重复样方,作为研究海拔高度对草甸土壤渗透性影响的处理。武功山金顶(主峰)区域为典型的旅游干扰区,在该海拔(1900 m)范围,参照国家质检总局 2004 年颁布的《天然草地退化、沙化盐渍化的分级指标》国家标准(GB 19377—2003)[18]和相关学者[19-21]对退化草地分级标准的研究结果,依据旅游干扰所造成的植被覆盖率(Coverage rate,缩写为 CR)减少后的相对百分数(%),设置无干扰 (Control check,缩写 CK,CR≥90%)、轻度干扰(Light disturbance, LD, 60%≤CR<90%)、中度干扰(Medium disturbance, MD, 30%≤CR<60%)、重度干扰(Severe disturbance, SD, CR<30%)等 4 种处理,每种处理随机设置 3 个 10 m×10 m 的重复样地,研究不同干扰程度对山地草甸土壤渗透性的影响。山地草甸不同研究处理及样地基本概况见表 1。

在每个 10 m×10 m 的样方内沿两条对角线及其交汇点进行 5 点采样,每个采样点的土壤包括两层,即 0—20 cm 和 20—40 cm,同土层深度的土壤混合均匀后,用"四分法"取出约 500 g 土壤装保鲜袋,带回实验室自然风干,拣去动植物残体和石块后进行粉碎,过 2 mm 筛孔制作待测样品,土壤 pH、有机质(OM)、碱解氮(AN)、速效磷(AP)、速效钾(AK)等化学指标采用土壤养分系统研究法(ASI 法)测定[22]。在每个样方内,按"品"字形或沿对角线方式各选 3 个重复采样点,各点间距在 5 m 左右,分 0—20 cm 和 20—40 cm 两个土层深度进行取样,每个样点的每层土壤均用 2 个环刀采样,1 个环刀的样品用来测定土壤容重、最大持水量、最小持水量、毛管持水量,另 1 个环刀的样品采用双环渗透法测定土壤入渗特性[23-24]。利用美国生产的 W.E.T Sensor Kit 土壤水分、温度速测仪进行土壤温度及水分的测定。

1.3　土壤渗透性指标计算及入渗过程拟合

参考相关文献资料[7],选择初渗率、平均入渗率、稳渗率、渗透总量作为研究土壤渗透特征的指标,其中:

初渗率=最初入渗时段内渗透量/入渗时间,本研究最初入渗时间为 2 min;

表 1 不同处理山地草甸样地基本概况

Table 1 The situation of the different treatments of mountain meadow

干扰程度 Disturbances	海拔 Elevation/m	坡度 Slope degree/ (°)	坡向 Slope direction	经度 Longitude (E)	纬度 Latitude (N)	主要植被类型 Main vegetation type	植被覆盖率 Vegetation coverage rate/%
	1593	6	NE20°	114°10′31.50	27°27′57.76	芒	100
	1588	8	NE23°	114°10′35.24	27°27′57.02	芒	95
	1583	10	NE22°	114°10′37.05	27°27′26.76	芒	99
	1695	7	NE28°	114°10′25.55	27°27′43.38	芒	98
	1699	8	NE24°	114°10′27.55	27°27′46.62	芒	100
	1699	8	NE22°	114°10′28.05	27°27′48.94	芒	96
	1811	10	NE27°	114°10′25.72	27°27′29.43	芒	97
	1802	8	NE27°	114°10′25.75	27°27′30.79	芒	98
	1799	6	NE26°	114°10′24.70	27°27′31.03	芒	95
CK	1907	7	NE25°	114°10′26.09	27°27′16.76	芒	98
	1904	9	NE27°	114°10′25.16	27°27′20.22	芒	97
	1903	6	NE29°	114°10′24.79	27°27′20.60	芒	100
LD	1914	5	NE23°	114°10′24.18	27°27′16.22	芒	76
	1917	8	NE27°	114°10′23.29	27°27′19.03	芒	82
	1901	7	NE26°	114°10′24.36	27°27′20.92	芒	73
MD	1912	6	NE24°	114°10′25.24	27°27′16.24	芒	47
	1920	8	NE28°	114°10′23.59	27°27′16.74	芒	55
	1921	<5	NE25°	114°10′23.41	27°27′17.16	芒	39
SD	1912	7	NE20°	114°10′24.87	27°27′16.18	芒	21
	1918	6	NE23°	114°10′23.04	27°27′17.00	芒	15
	1917	<5	NE25°	114°10′21.79	27°27′14.76	芒	19

CK:试验对照(无干扰),Control check(no disturbance);LD:轻度干扰,Light disturbance;MD:中度干扰,Medium disturbance;SD:重度干扰,Severe disturbance;NE:东偏北,north of due east

平均入渗率=达稳渗时的渗透总量/达稳渗时的时间;

稳渗率:单位时间内的渗透量趋于稳定时的渗透速率;

因所有土样渗透速率在 60 min 前已达稳定,为了便于比较,渗透总量统一取前 60 min 内的渗透量。

有关土壤水分入渗的数学模型有许多种,参照有关研究结果[3],选择 4 个常用的入渗模型来拟合武功山山地草甸土壤水分入渗过程,通过这些模型的对比分析,选出适用于该区域的最优模型。

(1)考斯加科夫(Kostiakov)模型:

$$f(t) = at^{-b}$$

式中:$f(t)$为土壤入渗率(mm/min);t 为入渗时间(min);a,b 为拟合参数。

(2)菲利普(Philip)模型:

$$f(t) = (1/2)S\,t^{-1/2} + A$$

式中:A 为稳渗率(mm/min);S 为土壤吸水率。

(3)霍顿(Horton)模型:

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)\,e^{-kt}$$

式中:f_c,f_0,k 分别为稳渗率、初渗率、常数。

(4)通用经验模型:

$$f(t) = a' + b'\,t^{-n}$$

式中:a',b' 为经验参数,n 为拟合参数。

1.4　数据处理

用 Microsoft Excel 2016 对数据进行初期统计与汇总,采用 SPSS 21.0 的单因素方差分析(one-way ANOVA)检验不同处理山地草甸土壤渗透性差异($\alpha=0.05$),当差异性显著时,采用 Turkey 法进行多重比较。对山地草甸土壤渗透性进行主成分分析;对土壤渗透性与土壤理化性质进行 Pearson 相关分析,并进行逐步回归分析,建立土壤渗透性的回归方程。

2　结果与分析

2.1　山地草甸土壤渗透特征

2.1.1　不同海拔山地草甸土壤渗透性

武功山不同海拔草甸土壤的初渗率、稳渗率、平均入渗率、渗透总量等 4 个指标分布规律相似(图 1),表现为初渗率>平均入渗率>稳渗率,0—20 cm 土层各指标数值高于 20—40 cm。在 0—20 cm 土层中,1600—1800 m,随着海拔的升高,各指标数值呈现降低的趋势,但是在 1900 m 海拔数值较高;20—40 cm 土层渗透性各指标呈现不规则的波动状分布,但 4 个指标均在 1700 m 海拔数值最高。不同海拔土壤渗透性分布特征为:

初渗率中,0—20 cm 土层其大小顺序为 1600 m>1900 m>1700 m>1800 m,即为 30.62 mm/min、15.91 mm/min、14.26 mm/min、3.42 mm/min,1600 m 与 1800 m 土壤初渗率差异显著($P<0.05$);20—40 cm 土层其大小顺序为 1700 m>1900 m>1600 m>1800 m,即为 2.62 mm/min、9.85 mm/min、0.15 mm/min、3.46 mm/min,1700 m 与 1600 m、1800 m 土壤初渗率差异显著($P<0.05$);1600 m 及 1900 m 两个海拔不同土层深度土壤初渗率差异显著($P<0.05$)。

稳渗率中,0—20 cm 土层其大小顺序为 1600 m>1700 m>1900 m>1800 m,即为 26.27 mm/min、12.26 mm/min、2.46 mm/min、7.82 mm/min,1600 m 与 1800 m、1900 m 土壤稳渗率差异显著($P< 0.05$);20—40 cm 土层其大小顺序为 1700 m>1900 m>1600 m>1800 m,即为 1.82 mm/min、8.24 mm/min、0.11 mm/min、2.58 mm/min,1800 m 土壤稳渗率与其他海拔差异显著($P<0.05$);1600 m 不同土层深度数值差异显著($P< 0.05$)。

平均入渗率中,0—20cm 土层其大小顺序为 1600 m>1700 m>1900 m>1800 m,即为 27.41 mm/min、13.19 mm/min、10.64 mm/min、2.85 mm/min,1600m 与 1800 m 土壤平均入渗率差异显著($P<0.05$),20—40 cm 土层其大小顺序为 1700 m>1900 m>1600 m>1800 m,即为 8.83 mm/min、3.02 mm/min、2.15 mm/min、0.12 mm/min,1700 m 与 1600 m、1800 m 土壤平均入渗率差异显著($P<0.05$);1600 m 不同土层深度土壤平均入渗率差异显著($P<0.05$)。

渗透总量中,0—20 cm 土层其大小顺序为 1600 m>1700 m>1900 m>1800 m,即为 1592.59 mm/min、750.48 mm/min、522.87 mm/min、151.41 mm/min,1600 m 与 1800 m、1900 m 土壤渗透总量差异显著($P<0.05$);20—40 cm 土层其大小顺序为 1700 m>1900 m>1600 m>1800 m,即为 501.58 mm/min、161.83 mm/min、114.30 mm/min、6.24 mm/min,1700 m 与 1600 m、1800 m 土壤渗透总量差异显著($P<0.05$);1600 m 不同土层深度土壤渗透总量差异显著($P<0.05$)。

2.1.2　不同干扰程度山地草甸土壤渗透性

不同干扰程度山地草甸土壤渗透性分布规律相同(图 2),均表现出初渗率>平均入渗率>稳渗率的特征,随着干扰程度的增强,土壤初渗率、稳渗率、平均入渗率和渗透总量等 4 个指标在不同土层深度均呈现递减的趋势,即 CK>LD>MD>SD。0—20 cm 土层渗透性各指标高于 20—40 cm。不同干扰程度土壤渗透性分布特征为:

初渗率中,0—20 cm 土层其数值为 15.91 mm/min、9.33 mm/min、7.18 mm/min、2.81 mm/min,CK 与 SD 土壤初渗率差异显著($P<0.05$);20—40 cm 土层其数值为 3.46 mm/min、2.11 mm/min、0.89 mm/min、0.32 mm/min,不同干扰程度土壤初渗率差异不显著($P>0.05$);CK 和 MD 不同土层深度土壤初渗率差异显著($P<0.05$)。

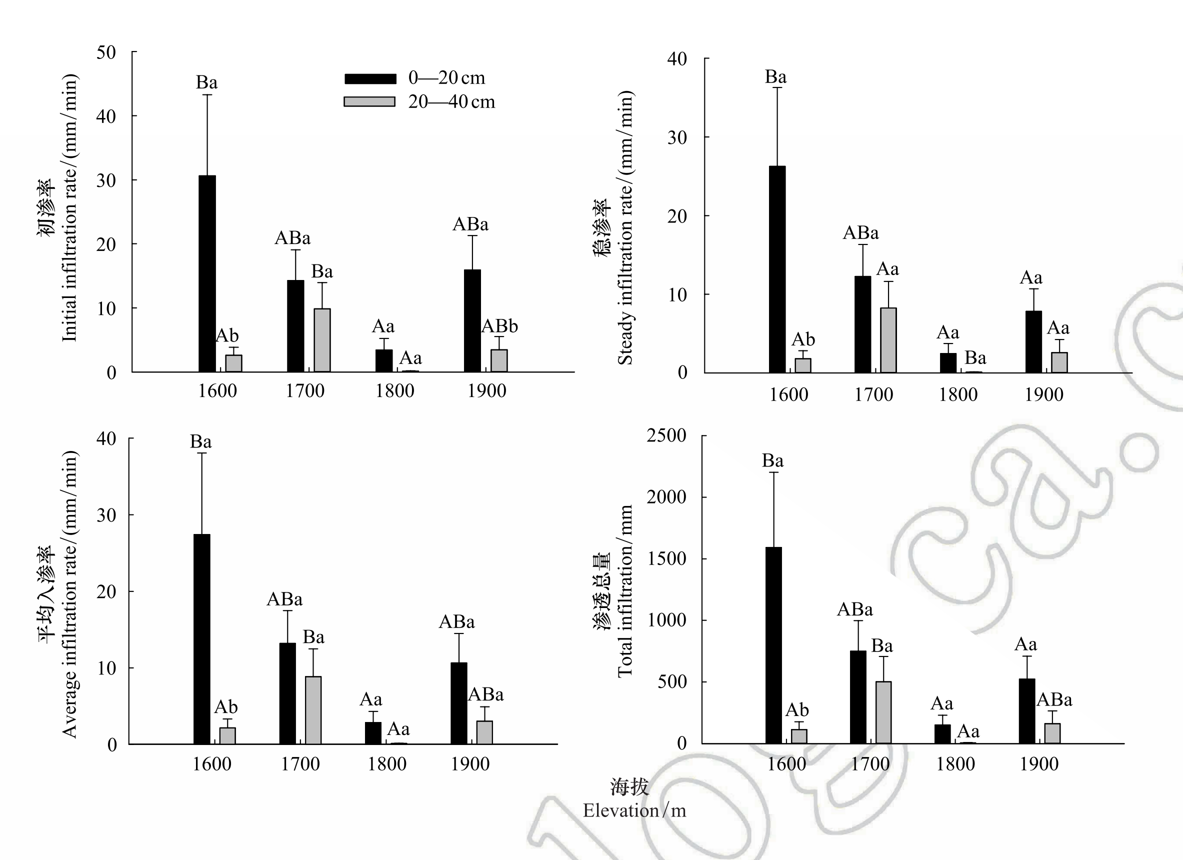


图 1 不同海拔高度山地草甸土壤渗透性(平均值±标准误)

Fig.1 Soil permeability of mountain meadow at different elevations(Mean±S.E.)

不同大写字母表示相同土层深度不同海拔差异显著(P<0.05),不同小写字母表示同一海拔不同土层深度差异显著(P<0.05)

稳渗率中,0—20 cm 土层其数值为 7.82 mm/min、3.44 mm/min、3.1 mm/min、1.88 mm/min,CK 与 SD 土壤稳渗率差异显著(P<0.05);20—40 cm 土层其数值为 2.58 mm/min、2.07 mm/min、0.63 mm/min、0.3 mm/min,不同干扰程度土壤稳渗率差异不显著(P>0.05);MD 不同土层深度土壤稳渗率差异显著(P<0.05)。

平均入渗率中,0—20cm 土层其数值为 10.64 mm/min、5.59 mm/min、4.39 mm/min、2.5 mm/min,CK 与 SD 土壤平均入渗率差异显著(P<0.05);20—40 cm 土层其数值为 3.02 mm/min、2 mm/min、0.68 mm/min、0.31 mm/min,CK 与 SD 土壤平均入渗率差异显著(P<0.05);MD 不同土层深度土壤平均入渗率差异显著(P<0.05)。

渗透总量中,0—20 cm 土层其数值为 522.87 mm/min、253.24 mm/min、203.5 mm/min、118.27 mm/min,CK 与 SD 土壤渗透总量差异显著(P<0.05);20—40 cm 土层其数值为 161.83 mm/min、103.96 mm/min、38.62 mm/min、18.02 mm/min,CK 与 SD 土壤渗透总量差异显著(P<0.05);MD 不同土层深度土壤渗透总量差异显著(P<0.05)。

2.2 不同海拔及干扰程度草甸土壤渗透性综合评价

以初渗率(F_1)、稳渗率(F_2)、平均入渗率(F_3)和渗透总量(F_4)为评定指标进行主成分分析,综合比较不同海拔及干扰程度下不同土层土壤渗透性能。从表 2 可知,第一个主成分的方差累积贡献率达 97.684%,第一主成分提供的信息量最大,而所有变量的正载荷相差不大,根据因子得分系数矩阵,其主成分方程为 $f=0.248F_1+0.254F_2+0.255F_3+0.255F_4$,通过方程计算不同海拔高度及不同干扰程度的上、下层的土壤渗透性得分,并进行排序(表 3 和表 4),可知不同处理土壤渗透性存在差异,在不同海拔高度上,0—20 cm 土层,在 1600 m 范围表现最优,20—40 cm 土层则是在 1700 m 范围表现最优,从平均得分来看,在 1600—1800 m,随海拔的增高,土壤渗透性逐渐降低,而在 1900 m 又有所提高(表 3),不同干扰程度上,0—20 cm 土层在 CK 表现最优,20—40 cm 土层,在 SD 表现最优,从平均得分来看,随着干扰程度的增强,土壤渗透性逐渐降低(表 4)。

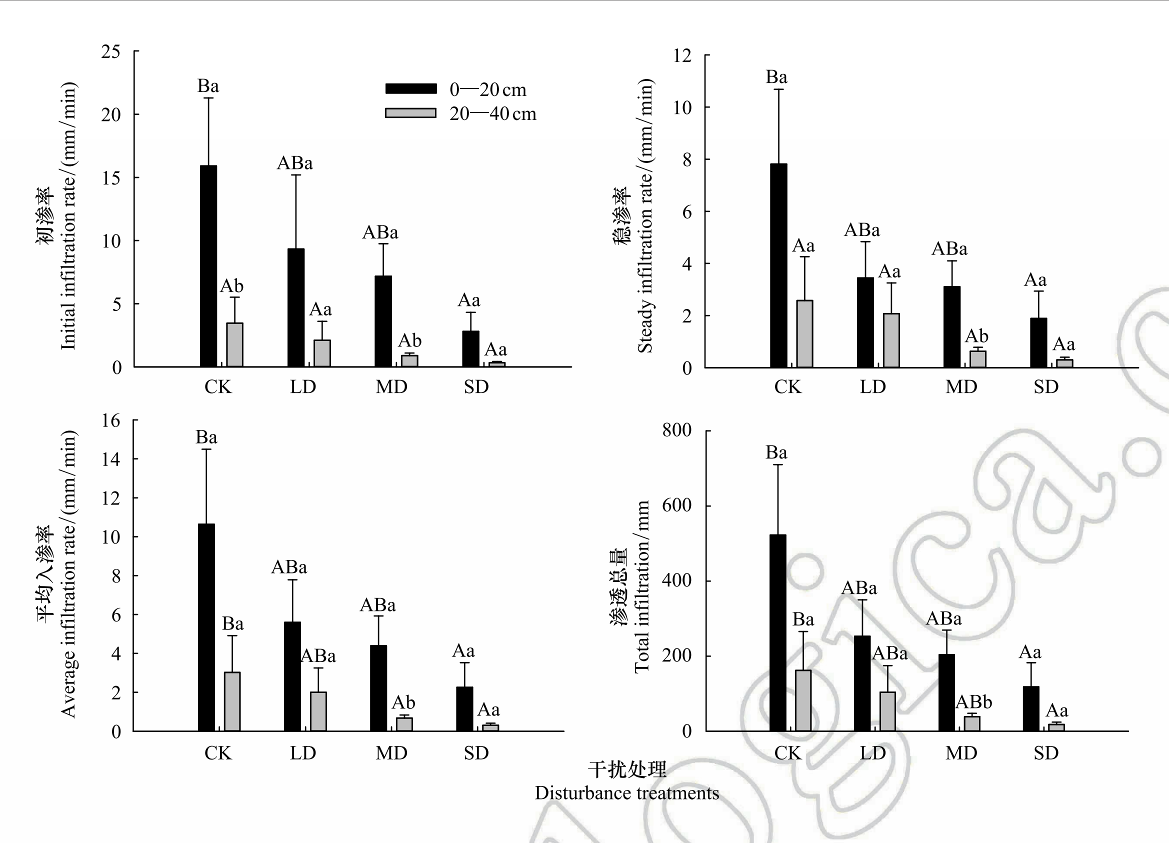


图 2　不同干扰程度山地草甸土壤渗透性(平均值±标准误)

Fig.2　Soil permeability of mountain meadow at different disturbance levels(Mean±S.E.)

不同大写字母表示相同土层深度不同干扰程度差异显著(P<0.05),不同小写字母表示同一干扰程度不同土层深度差异显著(P<0.05);CK:试验对照(无干扰),Control check(no disturbance);LD:轻度干扰,Light disturbance;MD:中度干扰,Medium disturbance;SD:重度干扰,Severe disturbance;NE:东偏北,north of due east

表 2　山地草甸土壤渗透性主成分分析

Table 2　Principal component analysis of mountain meadow soil infiltration

参数 Parameter	主分量 Principal component			
	P_1	P_2	P_3	P_4
F_1	0.968	0.251	0.014	0.000
F_2	0.991	−0.131	0.031	0.005
F_3	0.998	−0.027	−0.056	0.002
F_4	0.996	−0.085	0.011	−0.007
特征根 Characteristic root	3.907	0.088	0.004	0.000
方差贡献率 Variance contribution rate/%	97.684	2.204	0.110	0.002
累积贡献率 Cumulative contribution rate/%	97.684	99.888	99.998	100

表 3　不同海拔高度山地草甸土壤渗透性排序

Table 3　The order of mountain meadow soil infiltration at different elevations

海拔 Elevation/m	0—20 cm		20—40 cm		平均得分 Average score	排序 Order
	得分 Score	排序 Order	得分 Score	排序 Order		
1550—1650	3.10	1	−0.58	3	1.26	1
1650—1750	0.99	2	0.38	1	0.69	2
1750—1850	−0.48	4	−0.87	4	−0.68	4
1850—1950	0.63	3	−0.46	2	0.08	3

表 4　不同干扰程度山地草甸土壤渗透性排序

Table 4　The order of mountain meadow soil infiltration at different disturbance levels

处理 Experimental treatments	0—20 cm 得分 Score	0—20 cm 排序 Order	20—40 cm 得分 Score	20—40 cm 排序 Order	平均得分 Average score	排序 Order
CK	0.63	1	−0.46	2	0.08	1
SD	−0.33	3	−0.10	1	−0.22	2
MD	−0.25	2	−0.78	3	−0.52	3
SD	−0.57	4	−0.84	4	−0.70	4

2.3　不同海拔高度和干扰程度山地草甸土壤入渗特征模拟

不同处理山地草甸土壤入渗过程 4 个模型的拟合精度存在差异(表 5),通用经验模型拟合的相关系数为 0.84—0.98,平均相关系数为 0.92;Horton 模型拟合的相关系数为 0.57—0.98,平均相关系数为 0.85;Philip 模

表 5　山地草甸土壤入渗特征的拟合参数

Table 5　Fitting parameters of mountain meadow soil infiltration characteristics

干扰程度 Disturbances	土层 Layers/cm	通用经验模型 Common empirical model a'	b'	n	R^2	Horton 模型 Horton model f_c	f_0	k	R^2
	0—20	52.28	23.16	1.34	0.94	52.52	70.61	0.36	0.96
	20—40	3.3	3.34	0.64	0.88	3.62	6.14	0.17	0.94
	0—20	23.4	8.63	0.57	0.98	24.45	30.88	0.16	0.96
	20—40	16.37	7.5	1.17	0.95	18.21	17.35	0.04	0.57
	0—20	5.33	8.81	2.51	0.92	5.3	5.31	−0.06	0.65
	20—40	0.2	12.4	13.65	0.84	0.21	0.21	−0.05	0.51
CK	0—20	12.98	29.4	0.65	0.94	15.54	34.92	0.15	0.94
	20—40	4.47	3.7	0.46	0.9	5.12	7.68	0.13	0.97
LD	0—20	4.6	37.59	0.79	0.92	6.76	35.59	0.21	0.97
	20—40	2.46	9.08	0.24	0.89	6	10.4	0.08	0.9
MD	0—20	5.89	19.49	1.18	0.97	6.2	20.63	0.3	0.98
	20—40	1.27	4.98	3.28	0.96	1.27	6.22	1.13	0.86
SD	0—20	3.84	6.05	1.78	0.93	3.86	10.34	0.66	0.91
	20—40	0.6	0.17	1.65	0.87	0.6	0.74	0.43	0.72

干扰程度 Disturbances	土层 Layers/cm	Philip 模型 Philip model S	A	R^2	Kostiakov 模型 Kostiakov model a	b	R^2
	0—20	25.31	50.23	0.8	58.48	0.03	0.59
	20—40	6.37	3.11	0.87	5.47	0.11	0.8
	0—20	16.93	23.1	0.88	29.05	0.05	0.79
	20—40	9.52	15.64	0.76	18.82	0.04	0.59
	0—20	2.53	5.11	0.16	5.69	0.02	0.54
	20—40	0.12	0.19	0.14	0.22	0.02	0.53
CK	0—20	55.61	11.15	0.94	33.63	0.21	0.89
	20—40	7.42	4.56	0.9	7.3	0.1	0.85
LD	0—20	65.11	1.28	0.89	33.62	0.46	0.88
	20—40	15.64	5.03	0.87	11.19	0.16	0.88
MD	0—20	24.45	4.02	0.86	14.03	0.24	0.76
	20—40	1.19	1.15	0.56	1.55	0.06	0.41
SD	0—20	4.69	3.41	0.76	5.04	0.08	0.61
	20—40	0.13	0.59	0.5	0.62	0.01	0.55

a':经验参数,Empirical parameter;b':经验参数,Empirical parameter;n:拟合参数,Fitting parameter;R^2:相关系数(下同),Correlation coefficient(the same below);f_c:稳渗率,Steady infiltration rate;f_0:初渗率,Initial infiltration rate;k:常数,Constant;A:稳渗率,Steady infiltration rate;S:土壤吸水率,Soil water absorption rate;$f(t)$:土壤入渗率,Soil infiltration rate;t:入渗时间,Infiltration time;a:拟合参数,Fitting parameter;b:拟合参数,Fitting parameter

型拟合的相关系数为 0.14—0.94,平均相关系数为 0.71;Kostiakov 模型拟合的相关系数为 0.15—0.89,平均相关系数为 0.66。从拟合优度考虑,通用经验模型拟合效果最好,Horton 模型次之,Philip 模型和 Kostiakov 模型拟合效果都比较差。在相关系数为 0.92 以上的 17 个入渗最优模型中,通用经验模型有 9 个,占了 52.94%,Horton 模型有 7 个,占 41.18%,Philip 模型有 1 个,占 5.88%,无 Kostiakov 模型。所以,通用经验模型比较适合模拟武功山山地草甸区域的土壤入渗过程,而 Horton 模型的模拟效果不够理想,Philip 模型和 Kostiakov 模型不适合该区域内土壤水分入渗过程的模拟。

2.4　土壤渗透特性与土壤理化性质的关系

由表 6 可知,山地草甸土壤渗透性特征 4 个指标与土壤湿度、毛管持水量显著正相关($P<0.05$),与容重显著负相关($P<0.05$),初渗率、平均入渗率与速效氮含量显著正相关($P<0.05$),稳渗率、平均入渗率、渗透总量与速效钾含量显著正相关($P<0.05$)。以山地草甸理化指标土壤温度(A_1)、土壤湿度(A_2)、最大持水量(A_3)、毛管持水量(A_4)、最小持水量(A_5)、容重(A_6)、pH(A_7)、有机质(A_8)、速效氮(A_9)、速效磷(A_{10})、速效钾(A_{11})为自变量,土壤渗透性特征 4 个指标初渗率(F_1)、稳渗率(F_2)、平均入渗率(F_3)、渗透总量(F_4)为因变量,进行逐步回归分析,得到渗透性特征 4 个指标的指导因子方程为:$F_1=-26.871A_2+55.377$($R^2=0.164$, $P=0.008$),$F_2=0.426A_4-0.45A_5+2.451$($R^2=0.564$, $P<0.001$),$F_3=0.455A_4-0.481A_5+3.112$($R^2=0.563$, $P<0.001$),$F_4=25.91A_4-27.445A_5+163.489$($R^2=0.563$, $P<0.001$)。

表 6　山地草甸土壤理化性质与渗透特性的相关分析

Table 6　Correlation analysis of soil physical and chemical characteristics and mountain meadow soil infiltration

指标 Indexes	初渗率 Soil initial infiltration rate/(mm/min)	稳渗率 Steady infiltration rate/(mm/min)	平均入渗率 Average infiltration rate/(mm/min)	渗透总量 Total infiltration/mm
土壤温度 Soil temperature/℃	0.293	0.269	0.265	0.271
土壤湿度 Soil humidity/%	0.405**	0.366*	0.399**	0.377*
最大持水量 Maximum water holding capacity/(g/kg)	0.078	0.120	0.111	0.116
毛管持水量 Capillary water holding capacity/(g/kg)	0.355*	0.412**	0.412**	0.411**
最小持水量 Minimum water holding capacity/(g/kg)	0.096	0.131	0.131	0.130
容重 Soil bulk density/(g/cm^3)	−0.373*	−0.342*	−0.376*	−0.354*
土壤 pH Soil pH	0.201	0.206	0.216	0.209
有机质 Organic matter/%	−0.066	−0.147	−0.115	−0.138
速效氮 Available nitrogen/(mg/L)	0.316*	0.298	0.308*	0.300
速效磷 Available phosphorus/(mg/L)	0.183	0.204	0.199	0.201
速效钾 Available potassium/(mg/L)	0.265	0.318*	0.311*	0.313*

**. 在 0.01 水平(双侧)上显著相关, *. 在 0.05 水平(双侧)上显著相关

3　讨论

通过对武功山山地草甸土壤渗透性特征的分析,发现 0—20 cm 土层的土壤渗透性高于 20—40 cm,土壤渗透性受海拔影响,但其分布特征不完全与海拔高度变化相一致。总体来看,土壤初渗率、稳渗率、平均入渗率和前 60 min 渗透总量等在 1600 m 到 1800 m 随着海拔升高逐渐降低,在 1900m 又有所增加。有研究者[25-29]对青藏高原高寒草甸和北方山地红松、油松林的土壤养分、植被生物量或土壤渗透率状况进行研究,均发现所测定指标不完全与海拔高度趋势相一致,随着土层深度增加,土壤渗透性降低,与本文的研究结果相似。

随着干扰程度的增强,武功山山地草甸土壤渗透性呈现逐渐减小的趋势。王意锟等[6]对不同经营强度的毛竹林地土壤渗透性进行研究后发现,随着经营强度的增加,林地土壤渗透性也呈降低趋势,也与本研究结果相呼应。张晓芹等[30]对贺兰山及千佛山的草原植被进行研究,发现随着旅游干扰强度的增加土壤的容重

和含水量分别呈现增加和减低的趋势,这与本研究的结果一致。

土壤容重是土壤的透水性以及通气性的重要反映,土壤持水量、含水量、贮水量是反映水源涵养能力的重要指标[31],土壤的渗透及蓄水能力等受到土壤容重的影响,几项指标之间存在着相互作用的关系[32]。武功山草甸分布区海拔及旅游干扰程度的变化使土壤容重也产生了改变,而土壤渗透性所呈现的分布规律可能是因为随着海拔升高植被的长势逐渐矮化,根系也逐渐细浅,进而影响土壤渗透性呈递减趋势,而在 1900 m 海拔的风力相对其他海拔区域更大,为抵抗风力,该区域的植被根系可能更为密集、粗壮,进而影响到土壤容重及持水量等性能,致使渗透率在该海拔范围有所增加;旅游干扰的增强,游人踩踏行为增多,致使土壤致密性增加,容重也会变大,从而造成土壤渗透性的降低。

土壤水分入渗模型有许多种[9,33],在不同的研究区域,各个模型的适用性不同[6,34],因为目前对亚热带山地草甸渗透性特征的研究较少,所以本文采用了 4 个渗透模型分别对其适用性进行拟合,发现通用经验模型在该区域的拟合效果最好。土壤水分的渗透过程复杂,渗透性能越好,地表径流越少,土壤侵蚀量也会相应减少[35]。武功山不同海拔草甸上层及上、下层平均土壤渗透性在海拔 1800 m 范围最低,且与 1600 m 差异明显,可能在 1800 m 范围是山地草甸生态系统较为脆弱的区域,未来在进行开发的建设的时候要尤其注意做好保护措施。在 1900 m 的典型旅游干扰区,重度干扰的土壤渗透性最低,因此,要及时对该干扰程度下的草甸植被及土壤进行修复,以免造成进一步的土壤侵蚀。

4 结论

武功山山地草甸土壤渗透性在不同海拔高度总体表现为:在 1600—1800 m 范围,随着海拔升高土壤渗透性逐渐降低,而在高海拔的 1900 m 范围又渗透性提高。随着干扰程度的增强,土壤渗透性逐渐降低。表层(0—20 cm)土壤渗透性高于底层(20—40 cm),且初渗率>平均入渗率>稳渗率,通用经验模型能更好的拟合本研究区的土壤渗透过程。土壤渗透性与土壤湿度、毛管持水量呈显著正相关,与容重显著负相关,初渗率、平均入渗率与速效氮含量显著正相关,稳渗率、平均入渗率、渗透总量与速效钾含量显著正相关。

参考文献(References):

[1] 莫斌, 陈晓燕, 杨以翠, 罗帮林, 唐菊, 宫春明, 林芷行, 周土金, 申云康. 不同土地利用类型土壤入渗性能及其影响因素研究. 水土保持研究, 2016, 23(1): 13-17.

[2] Ma W M, Zhang X C. Effect of Pisha sandstone on water infiltration of different soils on the Chinese Loess Plateau. Journal of Arid Land, 2016, 8(3): 331-340.

[3] 李建兴, 何丙辉, 谌芸. 不同护坡草本植物的根系特征及对土壤渗透性的影响. 生态学报, 2013, 33(5): 1535-1544.

[4] 郇耀闯, 张光辉. 黄土丘陵区典型农耕地土壤稳定入渗率季节变化. 水土保持通报, 2016,36(2): 8-11.

[5] 石玉龙, 周晨霓, 王建峰, 邱英强, 马和平. 西藏色季拉山不同海拔梯度急尖长苞冷杉林土壤入渗特征研究. 林业资源管理, 2015,(4): 98-103.

[6] 王意锟, 金爱武, 方升佐, 田野. 浙西南不同经营强度下毛竹林土壤渗透性研究. 水土保持研究, 2015, 22(2): 41-46.

[7] 张淑兰, 张海军, 张武, 王长宝, 邓际华, 宋英博, 张强. 小兴安岭南麓典型森林类型的土壤水文功能研究. 水土保持研究, 2015, 22(1): 140-145.

[8] Novak J, Sigua G, Watts D, Cantrell K, Shumaker P, Szogi A, Johnson M G, Spokas K. Biochars impact on water infiltration and water quality through a compacted subsoil layer. Chemosphere, 2016, 142: 160-167.

[9] 康金林, 杨洁, 刘窑军, 涂安国. 初始含水率及容重影响下红壤水分入渗规律. 水土保持学报, 2016, 30(1): 122-126.

[10] 李真真, 郑翔, 牛德奎, 郭晓敏, 谢碧裕, 张学玲. 武功山山地草甸主要群落类型高光谱特征. 草业科学, 2016, 33(8): 1492-1501.

[11] 赵晓蕊, 郭晓敏, 张金远, 牛德奎, 单连友, 张文元, 魏晓华, 陈伏生, 黄尚书, 李志, 张学玲, 龚霞. 武功山山地草甸生态系统土壤无机磷垂直地带性分布特征. 草业科学, 2014, 31(9): 1610-1617.

[12] 赵自稳, 郭晓敏, 牛德奎, 刘宇新, 张学玲, 李真真, 张文元. 不同季节和退化程度下山地草甸土壤氮素含量的变化. 南方农业学报, 2015, 46(8): 1401-1405.

[13] 彭辉武, 刘忠华, 李萍球, 王伯民, 潜伟平, 刘江华, 邓树波. 武功山退化山地草甸土壤种子库的研究. 生态科学, 2016, 35(1): 98-102.

[14] 李梁平, 谢晓文, 胡明文. 武功山景区绿色营销的实施研究. 中南林业科技大学学报(社会科学版), 2015, 9(4): 23-26.

[15] Deng B L, Li Z Z, Zhang L, Ma Y C, Li Z, Zhang W Y, Guo X M, Niu D K, Siemann E. Increases in soil CO_2 and N_2O emissions with warming depend on plant species in restored alpine meadows of Wugong Mountain, China. Journal of Soils and Sediments, 2016, 16(3): 777-784.

[16] 袁颖丹, 李志, 牛德奎, 郭晓敏. 武功山山地草甸不同干扰程度土壤机械组成分布特征. 绿色科技, 2015(11): 27-28.

[17] 袁颖丹, 李志, 张文元, 牛德奎, 郭晓敏. 武功山山地草甸不同海拔土壤氮素分布及其与土壤物理性质的关系. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(10): 108-113.

[18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB19377—2003 天然草地退化、沙化、盐渍化的分级指标. 北京:中国标准出版社, 2004.

[19] Klimkowska A, Kotowski W, Van Diggelen R, Grootjans A P, Dzierża P, Brzezińska K. Vegetation re-development after fen meadow restoration by topsoil removal and hay transfer. Restoration Ecology, 2010, 18(6): 924-933.

[20] 刘淑丽, 林丽, 张法伟, 杜岩功, 李以康, 郭小伟, 欧阳经政, 曹广民. 放牧季节及退化程度对高寒草甸土壤有机碳的影响. 草业科学, 2016, 33(1): 11-18.

[21] 高艳美, 吴鹏飞. 高寒草甸退化对土壤昆虫多样性的影响. 生态学报, 2016, 36(8): 2327-2336.

[22] 金继运, 白由路, 杨俐平. 高效土壤养分测试技术与设备. 北京: 中国农业出版社, 2006:74-84.

[23] Su Z A, Zhang J H, Nie X J. Effect of soil erosion on soil properties and crop yields on slopes in the Sichuan Basin, China. Pedosphere, 2010, 20(6): 736-746.

[24] 中国林业科学研究院林业研究所. LY/T 1215—1999 森林土壤水分-物理性质的测定. 北京: 中国标准出版社, 1999.

[25] 王宁, 杨雪, 李世兰, 王楠楠, 韩冬雪, 冯富娟. 不同海拔红松混交林土壤微生物量碳、氮的生长季动态. 林业科学, 2016, 52(1): 150-158.

[26] 刘哲, 李奇, 陈懂懂, 翟文婷, 赵亮, 徐世晓, 赵新全. 青藏高原高寒草甸物种多样性的海拔梯度分布格局及对地上生物量的影响. 生物多样性, 2015, 23(4): 451-462.

[27] 德科加, 张德罡, 王伟, 徐成体, 张明, 魏希杰. 不同海拔下高寒草甸土壤养分分异趋势及其与地上植物量间的相关性研究. 草地学报, 2013, 21(1): 25-29.

[28] 卢振启, 黄秋娴, 杨新兵. 河北雾灵山不同海拔油松人工林枯落物及土壤水文效应研究. 水土保持学报, 2014, 28(1): 112-116.

[29] 鲁绍伟, 陈波, 潘青华, 李少宁, 张玉平, 任翠梅. 北京山地不同海拔人工油松林枯落物及其土壤水文效应. 水土保持研究, 2013, 20(6): 54-58.

[30] 张晓芹, 孙磊, 张强. 旅游干扰对济南千佛山风景区土壤部分生态因子的影响. 水土保持学报, 2015, 29(4): 332-336.

[31] 刘畅, 满秀玲, 刘文勇, 姚月锋, 范金凤. 东北东部山地主要林分类型土壤特性及其水源涵养功能. 水土保持学报, 2006,20(6): 30-33.

[32] 高强伟, 代斌, 罗承德, 刘丽, 马丹, 张翠翠. 蜀南竹海毛竹林土壤物理性质空间异质性. 生态学报, 2016, 36(8): 2255-2263.

[33] Liang C P, Hsu S X, Chen J S. An analytical model for solute transport in an infiltration tracer test in soil with a shallow groundwater table. Journal of Hydrology, 2016, 540: 129-141.

[34] 莫斌, 陈晓燕, 刘涛, 杨以翠, 黄秀凤, 黄启亮, 林芷行, 简慧, 周土金, 申云康. 紫色土丘陵区土壤入渗及其测定方法研究. 水土保持学报, 2016, 30(2): 116-121.

[35] 沈奕彤, 郭成久, 李海强, 吕明波. 降雨历时对黑土坡面养分流失的影响. 水土保持学报, 2016, 30(2): 97-101.